



## Mémoire de Master

Présenté par :

**REDJEL Ilyas**

Intitulé :

# Etude sur les diodes électroluminescentes

Soutenu publiquement le **14/10/2012** devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	BOUSBIA-SALAH Hicham	Docteur	Ecole Nationale Polytechnique
<b>Rapporteur :</b>	HADDADI Mourad	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
<b>Examineur :</b>	ADNANE Mourad	Docteur	Ecole Nationale Polytechnique
<b>Invité</b>	REMIDI Kamel		Ecole Normale Supérieure

**ENP 2012**

## Remerciements

*Au nom de Dieu le Clément et le Miséricordieux.*

*Louange à Dieu Seigneur des mondes, et que la bénédiction et la paix soient sur le dernier des envoyés de Dieu : Mohamed, sa famille, ses compagnons et tous ceux qui les ont suivi sur la bonne voie jusqu'au jour de la rétribution.*

*Mes remerciements les plus particuliers vont à mon promoteur monsieur **M.HADDADI**, qu'il trouve ici l'expression de ma vive gratitude pour ses précieux conseils, son suivi, sa disponibilité et son aide.*

*Monsieur **H.BOUSBIA-SALAH** m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. Qu'il en soit vivement remercié. Je le remercie, encore une fois, en tant que mon Ex-enseignant.*

*Mes remerciements vont aussi à Monsieur **M.ADNANE**, qui m'a fait l'honneur d'être l'examineur de ce mémoire. Pour avoir consacré du temps à l'évaluation de ce travail, je lui exprime ma vive reconnaissance.*

*J'exprime mes remerciements à mes **chers parents** et toute la famille pour leur soutien, leurs sacrifices et leurs encouragements.*

*Enfin, merci pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.*

*Ifyas.*

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à mes **chers parents** à qui j'adresse au Dieu les vœux les plus ardents pour la conservation de leur santé et de leur vie.*

*A mes **chers frères et sœurs** à qui je souhaite beaucoup plus de succès.*

*A tous mes **chers amis**.*

*Et à toute la promotion des électroniciens : **2012**.*

*Ilyas*

## **ملخص:**

الإضاءة تمثل حاليا حوالي 19% من إنتاج الكهرباء في العالم، وقد ولدت عام 2005 : 1890 مليون طن تقريبا من ثاني أكسيد الكربون، في زمن التنمية المستدامة، ضعف استهلاك الطاقة والتأثير على البيئية هي السمة المميزة للصمامات الثنائية الباعثة للضوء، عمرها الافتراضي والتطور الهام في كفاءتها الضوئية يجعلها في طليعة مصادر الإضاءة المستقبلية؛ ومن أجل هذا الغرض نقترح دراسة مفصلة عن هذه الصمامات فيما يخص مبدأ الإشتغال، أنواعها، ونظرة مستقبلية حول سبل تعميم استعمالها لغرض الإضاءة.

## **كلمات مفتاحية:**

صمامات ثنائية باعثة للضوء، LED، وصلة PN، أشباه الموصلات، كفاءة ضوئية، مصدر مضيء.

## **Résumé :**

L'éclairage représente actuellement environ 19 % de la production électrique mondiale, cela a engendré en 2005 environ 1 890 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. A l'heure du développement durable, la faible consommation électrique et l'impact environnemental sont les vocables qui caractérisent les diodes électroluminescentes; leur durée de vie et l'évolution croissante de leur efficacité lumineuse les mettent au premier rang des sources d'éclairage du futur; à cette fin, nous proposons une étude détaillée de ces diodes en ce qui concerne leur principe de fonctionnement, types, et des perspectives sur leur utilisation à des fins d'éclairage.

## **Mots clés :**

Diodes électroluminescentes, LED, jonction PN, semiconducteur, efficacité lumineuse, source d'éclairage.

## **Abstract :**

The lighting currently represents approximately 19% of global electricity production, it has generated in 2005 about 1890 million tons of CO<sub>2</sub>. At the time of sustainable development, weak energy consumption and environmental impact are the main characteristics of light emitting diodes (LED); their life span and the increasing evolution of their luminous efficiency put them at the forefront of light sources of the future; to this end, we propose a detailed study of these diodes in regard to their operating principle, types, and perspectives on their use for future lighting.

## **Keywords :**

Light emitting diodes, LED, PN junction, semiconductor, luminous efficiency, lighting source.

# Sommaire

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>

## Chapitre I: Généralités sur les semi-conducteurs

<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>II. STRUCTURE D'UN ATOME .....</b>	<b>3</b>
<b>III. CONDUCTEURS, DIELECTRIQUES ET SEMICONDUCTEURS .....</b>	<b>6</b>
III.1 CONDUCTEURS .....	6
III.2 DIELECTRIQUES ET SEMICONDUCTEURS .....	6
<b>IV. FAMILLES DES SEMICONDUCTEURS .....</b>	<b>7</b>
IV.1 SEMICONDUCTEURS INTRINSEQUES .....	7
IV.2 SEMICONDUCTEUR EXTRINSEQUE .....	9
<b>V. TYPES DES SEMICONDUCTEURS.....</b>	<b>9</b>
V.1 SEMICONDUCTEUR DE TYPE N .....	9
V.2 SEMICONDUCTEUR DE TYPE P : .....	10
<b>VI. CONCLUSION : .....</b>	<b>10</b>

## Chapitre II: La jonction PN

<b>I. INTRODUCTION : .....</b>	<b>11</b>
<b>II. DEFINITION : .....</b>	<b>11</b>
<b>III. PRINCIPE DE JONCTION PN .....</b>	<b>11</b>
III.1 Jonction P-N polarisée en inverse : .....	12
III.2 Jonction P-N polarisée en direct : .....	12
<b>IV. CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION : .....</b>	<b>13</b>
IV.1 Caractéristique directe .....	13
IV.2 Caractéristique inverse .....	14
IV.3 Claquage inverse Zener .....	14
IV.4 Limites d'utilisation des diodes .....	14
<b>V. CONCLUSION .....</b>	<b>15</b>

## Chapitre II: Les Diodes électroluminescentes

I. INTRODUCTION .....	16
II. DEFINITION : .....	16
III. HISTORIQUE : .....	17
IV. LES DIFFERENTS TYPES DE LED : .....	18
IV.1 LES LED CMS : .....	18
IV.2 LES LED COLOREES : .....	19
IV.3 LES LED BLANCHES : .....	20
❖ Diodes électroluminescentes bleues .....	20
❖ Comment obtient-on de la lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes ? .....	20
❖ Bleu + phosphore(s) .....	21
❖ L'ultraviolet et le phosphore : .....	22
❖ RGB .....	22
❖ PRS LED .....	23
IV.4 LES LED UV .....	23
IV.5 LED MULTICOLORES : .....	24
IV.6 LES LED DE PUISSANCE : .....	25
IV.7 LES OLED (DIODES ELECTROLUMINESCENTES ORGANIQUES) .....	26
V. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES D'UNE LED : .....	27
V.1 PROPRIETES ELECTRONIQUES DES LED .....	27
❖ Propriétés principales .....	27
❖ Propriétés secondaires .....	28
V.2 PROPRIETES PHOTOMETRIQUES DES LED .....	28
❖ Propriétés optiques des LED : .....	28
❖ Propriétés colorimétriques des LED : .....	29
PROPRIETES ENVIRONNEMENTALES DES LED : .....	30
VI. LE FUTUR DES LED .....	31
VII. CONCLUSION : .....	33

**Conclusion Générale.....34**  
**Bibliographie.....35**  
**Annexes.....36**

## Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1</b>	Atome de silicium	4
<b>Figure I.2</b>	Les différents niveaux énergétiques d'un électron	4
<b>Figure I.3</b>	Diagramme des niveaux énergétiques dans un système à plusieurs atomes	5
<b>Figure I.4</b>	Apparition des bandes d'énergie dans un réseau cristallin	5
<b>Figure I.5</b>	états énergétiques des électrons d'un cristal	5
<b>Figure I.6</b>	Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction	6
<b>Figure I.7</b>	Structure d'un atome de semiconducteur intrinsèque	7
<b>Figure I.8</b>	Liaison au sein du réseau cristallin d'un semiconducteur	8
<b>Figure I.9</b>	Structure tridimensionnelle du réseau cristallin du silicium	8
<b>Figure I.10</b>	Apparition d'une paire électron-trou dans un semiconducteur intrinsèque	9
<b>Figure I.11</b>	Semiconducteur dopé avec un élément de valence V	10
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Jonction P-N à l'équilibre	11
<b>Figure II.2</b>	Jonction PN polarisée en inverse	12
<b>Figure II.3</b>	Jonction P-N polarisée en direct	13
<b>Figure II.4</b>	Caractéristique Courant-tension	13

<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Schéma d'une LED	16
<b>Figure III.2</b>	La découverte d'électroluminescence par Henry Joseph Round en 1907	18
<b>Figure III.3</b>	LED montée en surface	19
<b>Figure III.4</b>	Diagramme de chromaticité	19
<b>Figure III.5</b>	LED bleue recouverte de phosphore	21
<b>Figure III.6</b>	LED Ultraviolet + Phosphore	23
<b>Figure III.7</b>	Longueur d'onde et gap	24
<b>Figure III.8.(a)</b>	Une LED tricolore	25
<b>Figure III.8.(b)</b>	Modélisation d'une LED tricolore	25
<b>Figure III.9.(a)</b>	LED de puissance seule	25
<b>Figure III.9.(b)</b>	LED de puissance avec lentille	26
<b>Figure III.10</b>	chronogramme élémentaire du 74HC595 Analogie Ciel/OLED Soleil/LED	26
<b>Figure III.11</b>	Caractéristique d'alimentation d'une LED	27
<b>Figure III.12</b>	Représentation de différents angles d'émission de LED	29
<b>Figure III.13</b>	Evolution de la répartition relative spectrale d'une LED verte en fonction de la température	30
<b>Figure III.14</b>	Evolution de la répartition relative spectrale d'une LED bleue en fonction de la température	30
<b>Figure III.15</b>	Evolution des performances des LED	31
<b>Figure III.16</b>	Evolution de l'efficacité des LED	31
<b>Figure III.17</b>	feuille de route et recommandation de SSL-LED (2002)	32

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Table</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b>	Caractéristiques des substrats utilisés dans la jonction PN	12
<b>Tableau II.2</b>	Tension de seuil	13
<b>Tableau III.1</b>	Couleurs et longueurs d'onde associées	29
<b>Tableau 2.2</b>	Caractéristiques générales de l'ULN2804	20
<b>Tableau 2.3</b>	Caractéristiques générales du PVC200401PTN	21
<b>Tableau 2.4</b>	Les caractéristiques électriques de matrice HS2088B	27
<b>Tableau 2.5</b>	Broches du 74HC595	28

# *Introduction générale*

Les technologies de l'éclairage sont nées du besoin de suppléer à la lumière solaire. De la préhistoire à nos jours, trois types de technologies ont été successivement développées : tout d'abord bien sûr les lampes à combustion (huile, gaz) puis, à partir de 1880, les lampes à incandescence (filament chaud de tungstène sous gaz inerte ou halogène) et, depuis les années cinquante, les lampes à décharge (tubes fluorescents à mercure, lampes à vapeur de sodium). Plusieurs critères permettent de classer ces différentes sources lumineuses : le coût (achat, fonctionnement, durée de vie), les caractéristiques de la lumière émise (température de couleur, indice de rendu des couleurs), et l'impact environnemental (rendement énergétique de conversion lumière/électricité, fabrication et recyclage). L'impact environnemental, notamment la consommation d'énergie, est le critère qui suscite aujourd'hui le développement d'une nouvelle voie pour l'éclairage. En effet le rendement de conversion lumière/électricité des sources traditionnelles reste faible, de quelques pourcent pour les lampes à incandescence à 25 % au maximum pour les lampes à décharge. Ainsi aujourd'hui, l'éclairage correspond à 20 % de l'électricité consommée mondialement. La feuille de route pour les économies d'énergie de la plupart des grands pays industrialisés fixe comme objectif de réduire d'un facteur 2 cette dépense énergétique à l'horizon 2020, ce qui revient à multiplier par 2 le rendement des sources lumineuses. Ceci ne peut être obtenu par l'amélioration des sources actuelles, et nécessite donc une rupture technologique de la même nature que celle qui a conduit à remplacer en électronique les lampes par les transistors à semi-conducteur. On parle en effet d'éclairage par source à l'état solide. Il s'agit en fait d'utiliser un composant à semi-conducteur classique de l'optoélectronique : la diode électroluminescente (LED).

Notre travail, était de faire une étude sur ces sources de lumière en basant sur leur principe de fonctionnement et les différent types présents, ainsi que donner une étude

prospective sur le futur de cette technologie qui va être sans doute le successeur des lampes traditionnels.

Pour faire cela, nous avons divisé le travail en trois chapitres :

Chapitre 1 : Une étude générale sur les semiconducteurs est présentée, en se basant sur la structure atomique des différents matériaux.

Chapitre 2 : Une présentation de la jonction PN, la structure élémentaire de tous les éléments électronique passifs est donnée pour préparer le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Une structuration des diodes électroluminescentes est présentée, ainsi que les différents types de ces diodes, un historique, et une étude prospective concernant le futur de cette technologie qui est très prometteur.

# Chapitre I : Généralités sur les semi- conducteurs

## I. Introduction

Pendant très longtemps on croyait que vis-à-vis de la conduction électrique, les matériaux se subdivisaient en deux classes : conducteurs et diélectriques (isolants). Cependant, vers 1830 on a découvert des matériaux dont les propriétés ne permettaient de les classer dans aucune de ces catégories. À l'état pur, ces matériaux étaient à la fois de mauvais conducteurs et de mauvais isolants : or leurs propriétés électriques, notamment la résistivité, variaient très sensiblement sous influence des facteurs extérieurs : de l'environnement (température, pression...), de la présence des impuretés, de la lumière, etc... En occupant une place intermédiaire entre les conducteurs et les isolants, ces matériaux ont été appelés : « **semiconducteurs** ».

## II. Structure d'un atome

On sait que les éléments chimiques diffèrent par la structure de leurs atomes, notamment, par le nombre des électrons, des protons, et des neutrons. Les deux dernières particules font partie du noyau d'un atome, les électrons gravitent autour du noyau.

La mécanique quantique explique et détaille la structure d'un atome isolé. Les équations de la mécanique quantique mettent en évidence une « quantification » des niveaux d'énergie des électrons dans un atome [1]. Autrement dit, l'énergie d'un électron ne peut prendre que certaines valeurs qui dépendent de la configuration de l'atome. On parle des « couches énergétiques » d'un atome (niveaux de l'énergie autorisés pour les électrons). Le nombre des électrons sur une couche est limité : deux électrons sur la première couche (niveau d'énergie le plus bas), huit sur la deuxième, dix-huit sur la troisième etc... Le nombre total des électrons est déterminé par le nombre des protons dans le noyau (car l'atome est neutre) ainsi, toutes les couches ne sont pas nécessairement remplies. Les électrons remplissent les couches à partir de la couche à énergie la plus faible correspondant à la distance la plus petite du noyau.

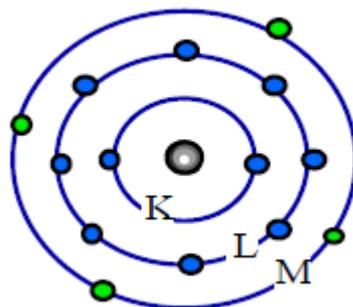


Figure I.1: Atome de silicium

Les électrons d'un atome gravitant autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux discrets  $E_1, E_2, \dots$  En qui définissent chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine des énergies ( $E = 0 \text{ eV} - 1\text{eV}$  représentant  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ ) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs de  $E_n$  sont négatives. Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron.

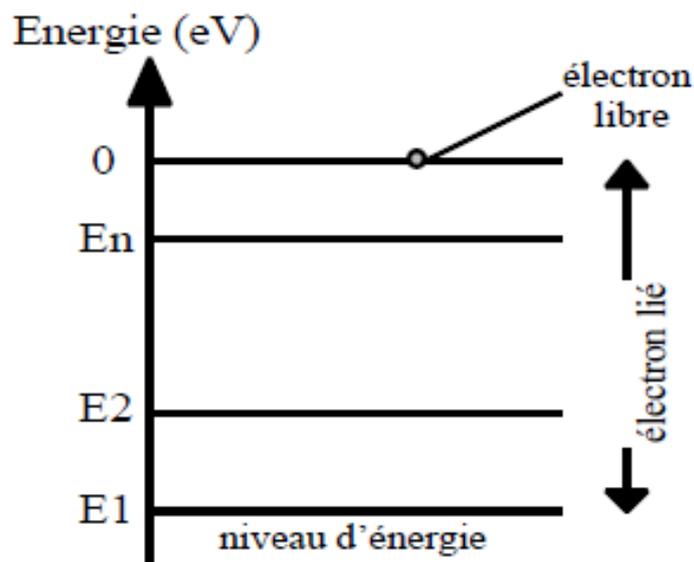


Figure I.2: les différents niveaux énergétiques d'un électron

Lorsque les atomes sont associés dans un réseau cristallin d'un corps solide, l'interaction entre les atomes modifié la distribution des états autorisés pour les électrons. Une modification des états est nécessaire. Ainsi, dans un système composé de plusieurs atomes, les états d'énergie des atomes individuels, initialement identiques, se séparent pour former des états multiples plus ou moins rapprochés (figure I.3).

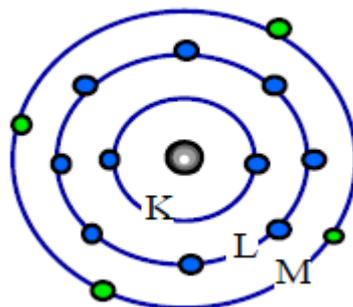


Figure I.1: Atome de silicium

Les électrons d'un atome gravitant autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux discrets  $E_1, E_2, \dots$  En qui définissent chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine des énergies ( $E = 0 \text{ eV} - 1\text{eV}$  représentant  $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ ) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs de  $E_n$  sont négatives. Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron.

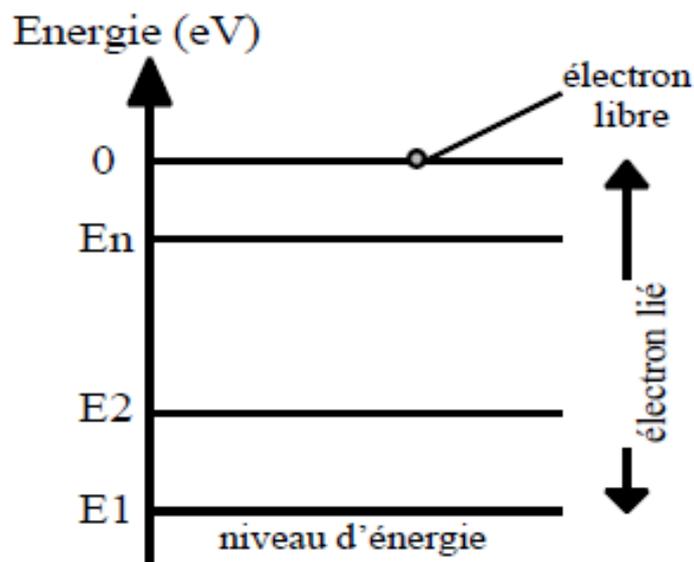


Figure I.2: les différents niveaux énergétiques d'un électron

Lorsque les atomes sont associés dans un réseau cristallin d'un corps solide, l'interaction entre les atomes modifié la distribution des états autorisés pour les électrons. Une modification des états est nécessaire. Ainsi, dans un système composé de plusieurs atomes, les états d'énergie des atomes individuels, initialement identiques, se séparent pour former des états multiples plus ou moins rapprochés (figure I.3).

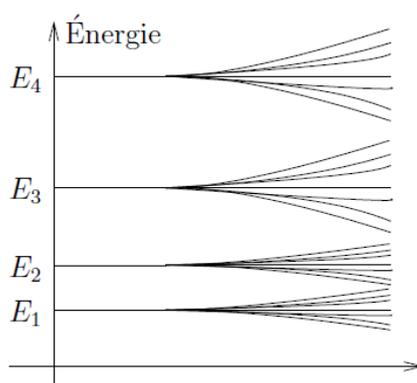


Figure I.3: Diagramme des niveaux énergétiques dans un système à plusieurs atomes

Si le système est composé d'un très grand nombre d'atomes (c'est le cas de cristaux), les niveaux individuels se transforment en zones énergétiques avec un très grand nombre d'états très rapprochées (figure I.4). On parle alors des bandes d'énergie.

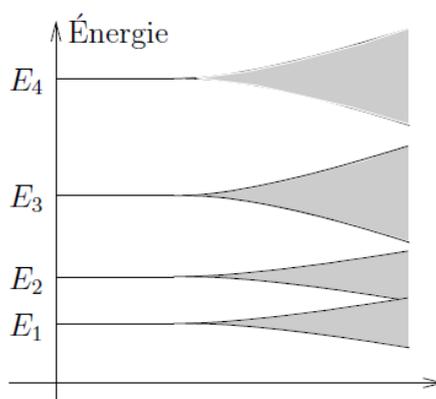


Figure I.4: Apparition des bandes d'énergie dans un réseau cristallin

Dans un corps solide, deux bandes sont particulièrement importantes pour la compréhension des phénomènes de conduction : la bande de conduction et bande de valence. La bande de conduction représente les énergies des électrons libres, dans la bande de valence se situent les électrons liés avec le réseau cristallin (figure I.5).

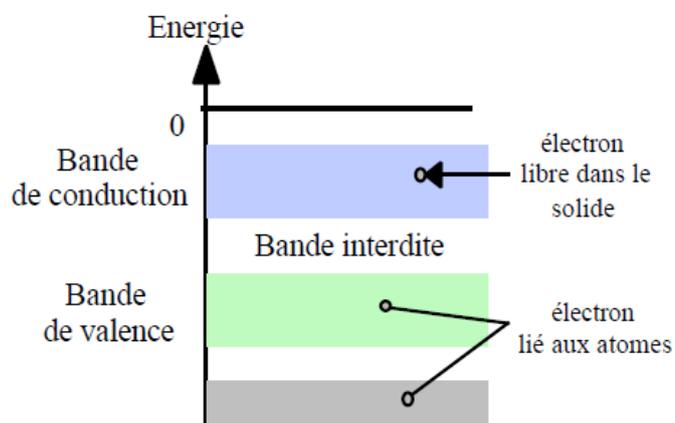


Figure I.5: états énergétiques des électrons d'un cristal

Les bandes sont séparées par une zone énergétique interdite : c'est la plage des énergies que les électrons ne peuvent pas posséder. Cette zone aussi que sa largeur, s'appelle gap énergétique. C'est un paramètre propre du matériau. Ainsi, les électrons peuvent passer directement de la bande de valence vers la bande de conduction; or pour cela il faut qu'ils acquièrent une énergie égale au moins à la largeur du gap.

### III. Conducteurs, diélectriques et semiconducteurs

#### III.1 Conducteurs

A l'état d'équilibre les métaux sont des cristaux qui possèdent des électrons dans la bande de conduction. Deux cas sont possibles :

1) La bande de valence et la bande de conduction se recouvrent, i.e. le gap est négatif. C'est notamment le cas des métaux dit « de transition », par exemple, le cuivre. Les atomes de ces métaux ont un nombre d'électrons pairs sur la couche périphérique.

2) Les bandes ne se recouvrent pas mais à l'équilibre il y a des électrons occupant des niveaux d'énergie dans la bande de conduction. Cependant, tous les niveaux de la bande ne doivent pas être remplis, sinon les électrons ne peuvent pas se déplacer librement. C'est le cas des métaux alcalins et des métaux nobles.

#### III.2 Diélectriques et semiconducteurs

Dans le cas des diélectriques et des semiconducteurs, la bande de conduction se situe plus haut que la bande de valence (figure I.6) et à température de zéro absolu tous les niveaux dans la bande de valence sont remplis.

Ainsi, pour passer de la bande de valence vers la bande de conduction (i.e. se détacher de son atome), un électron doit posséder l'énergie égale à la largeur de gap. Le plus souvent l'énergie est transmise à l'électron par la voie thermique. Cependant, ce n'est pas le mécanisme unique : l'énergie peut avoir une origine optique, électrique, radioactive...etc.

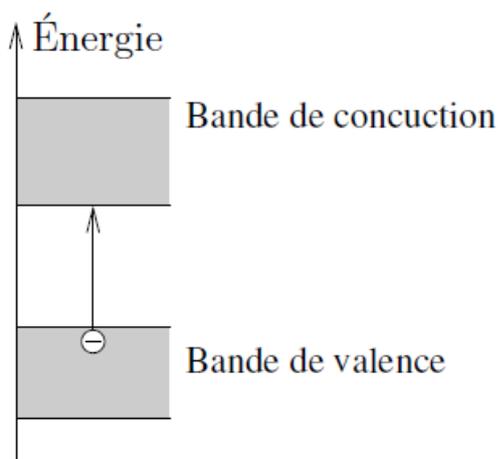


Figure I.6: Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction.

Chez les diélectriques, le gap est élevé. Dans les conditions normales peu d'électrons sont capables de franchir ce gap, et presque tous les électrons restent dans la bande de valence. Dans un diélectrique il y a peu d'électrons libres.

Les semiconducteurs ressemblent aux diélectriques, seulement leur gap est beaucoup plus faible, généralement inférieur à 1.2 eV (1.1 eV pour silicium, 0.7 eV pour germanium). Ainsi, il suffit de communiquer aux électrons une très faible énergie pour qu'ils puissent franchir le gap et devenir libres. La quantité des électrons ayant franchi le gap dépend très fortement de la température, si cette énergie est nulle (température de zéro absolu), le semiconducteur est un diélectrique parfait, car tous les électrons se situent dans la bande de valence. Lorsque la température augmente, la quantité de porteurs libres croît sensiblement. Ainsi, à la différence des métaux, la résistivité d'un semiconducteur diminue avec la température.

## IV. Familles des semiconducteurs

### IV.1 Semiconducteurs intrinsèques

Un semiconducteur pur est appelé semiconducteur intrinsèque. Les semiconducteurs ont une valence de IV : cela veut dire que la couche périphérique de leurs atomes contient 4 électrons. Au total, cette couche peut contenir 8 électrons, alors, 4 états de la couche sont vacants. On peut représenter l'atome du semiconducteur (par exemple, celui du silicium ou du germanium) par un diagramme de la figure I.7.

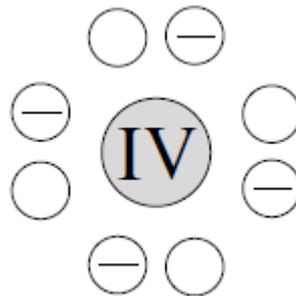


Figure I.7: Structure d'un atome de semiconducteur intrinsèque

Pour s'allier dans un réseau cristallin, les atomes partagent chaque électron de la couche périphérique avec un des quatre atomes voisins; de même, les quatre états vacants d'un atome sont occupés par les quatre électrons des quatre atomes voisins (figure I.8).

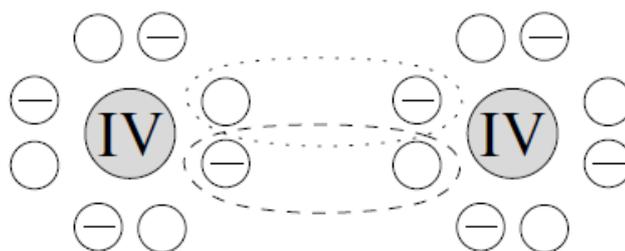


Figure I.8: Liaison au sein du réseau cristallin d'un semi-conducteur

Cette configuration résulte en une liaison covalente très solide, qui emploie tous les électrons ne laissant libre aucun. La (figure I.9) présente la géométrie tridimensionnelle du réseau cristallin d'un semi-conducteur intrinsèque.

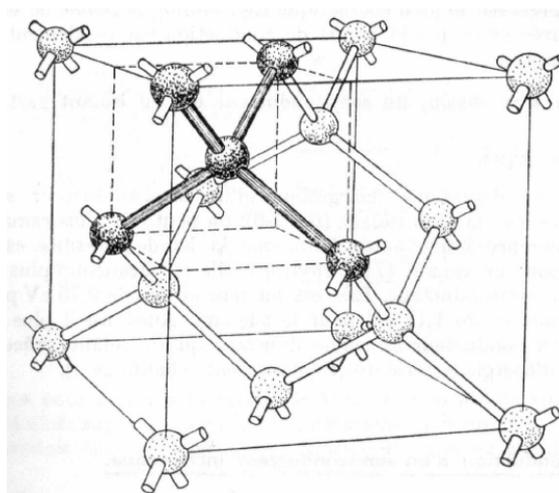


Figure I.9: Structure tridimensionnelle du réseau cristallin du silicium

Lorsque un électron franchit le gap et se retrouve dans la bande de conduction, il quitte son atome et se déplace librement à travers le réseau. Soumis à un champ électrique extérieur, cet électron se comporte comme un électron libre dans un conducteur : il se déplace dans le sens d'accroissement du potentiel du champ extérieur.

Or à l'ancien emplacement de l'électron dans le réseau cristallin, il se produit un phénomène particulièrement intéressant. Lorsqu'un électron se détache, l'état énergétique dans la bande de valence se trouve inoccupé, et dans le réseau apparaît une lacune, un emplacement où il manque un électron.

Cet emplacement exerce une attraction sur des électrons voisins du réseau ainsi, un électron de la bande de valence, ayant une énergie proche de celle qui correspond à l'état inoccupé, peut y être capturé ; à son tour, cet électron laisse son état libre : celui-ci peut capturer un autre électron, et ainsi de suite. De cette manière, un état vacant peut se propager à travers le cristal (figure I.10).

En physique une telle lacune d'électron a reçu le nom « trou ».

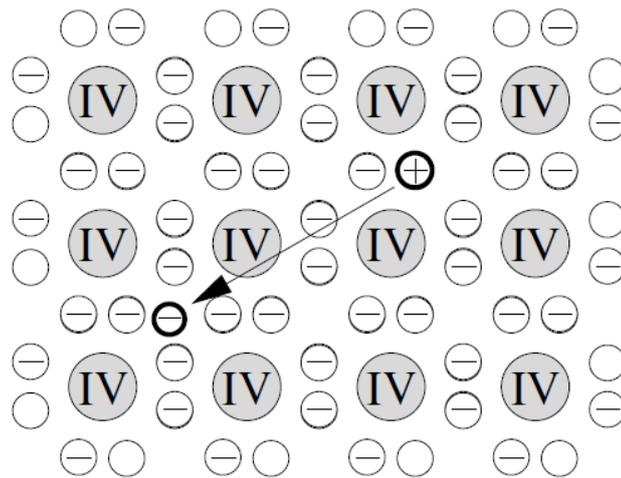


Figure I.10: Apparition d'une paire électron-trou dans un semiconducteur intrinsèque

## IV.2 Semiconducteur extrinsèque

Une introduction d'une très faible quantité d'impuretés dans un semiconducteur peut modifier très sensiblement ses propriétés électriques.

Tout dépend des atomes d'impuretés ajoutés au semiconducteur, on distingue deux types de semiconducteur extrinsèque : un dit de type N, et un de type P. Une étude détaillée sur les deux types est présentée dans le paragraphe qui suit.

## V. Types des semiconducteurs

### V.1 Semiconducteur de type n

On introduit dans le cristal de silicium des atomes d'impuretés pentavalents tels que le phosphore **P**, l'arsenic **As** et l'antimoine **Sb** [2].

Chaque atome d'impureté amène un électron de valence supplémentaire. Cet électron est peu lié au noyau ( $E \approx 0,01$  eV) et passe aisément dans la bande de conduction. La conductivité du matériau (conductivité extrinsèque) devient à cause du taux de dopage, très supérieure à celle du matériau pur. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction.

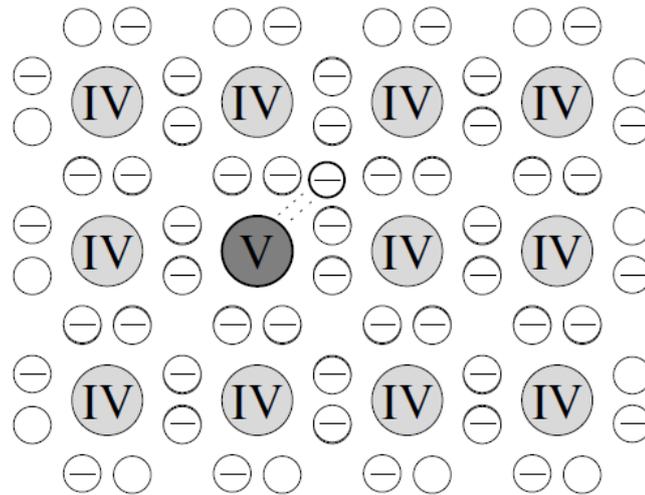


Figure I.11: Semiconducteur dopé avec un élément de valence V

### V.2 Semiconducteur de type p :

On introduit dans le réseau une impureté trivalente : bore B, aluminium Al, gallium Ga, indium In [2]. Il manque à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'énergie ( $E \approx 0,05 \text{ eV}$ ) suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (accepteurs) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur. La conduction de type P (positive) est assurée par des trous.

## VI. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exploité les caractéristiques des matériaux en termes de conduction électrique qui est lié aux différents niveaux énergétiques d'électrons du matériau. Nous avons commencé par structurer l'atome qui est la particule élémentaire de chaque matériau; si ces atomes s'arrangent pour former un cristal et tout dépend de de la nature du matériau, on peut avoir des matériaux qui sont à la fois conducteurs et isolant, on les appelle « les Semi-conducteurs».

## Chapitre II : La jonction PN

### I. Introduction :

La jonction PN est la structure la plus élémentaire de l'électronique moderne, dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs actifs à semiconducteur.

### II. Définition :

Une jonction PN est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N. Les connexions avec le milieu extérieur sont réalisées par des contacts métalliques.

### III. Principe de jonction PN

En pratique, on part d'une plaque de silicium dopée N sur laquelle on crée en général par diffusion une zone dopée P. la zone de séparation entre les deux matériaux nommée la zone de transition, a une épaisseur très faible (typiquement  $0,5 \mu\text{m}$ ). Dans cette zone, les taux de dopages et donc le nombre de porteurs libres varient avec la distance [2].

Dans la zone P les porteurs majoritaires sont les trous. Les atomes accepteurs constituent un réseau d'ions négatifs. De même dans la zone N les porteurs majoritaires sont les électrons. Les atomes donneurs constituent un réseau d'ions positifs.

Les trous ont tendance à occuper la zone N où ils se recombinent avec des électrons. De même des électrons de la zone N vont combler des trous de la zone P.

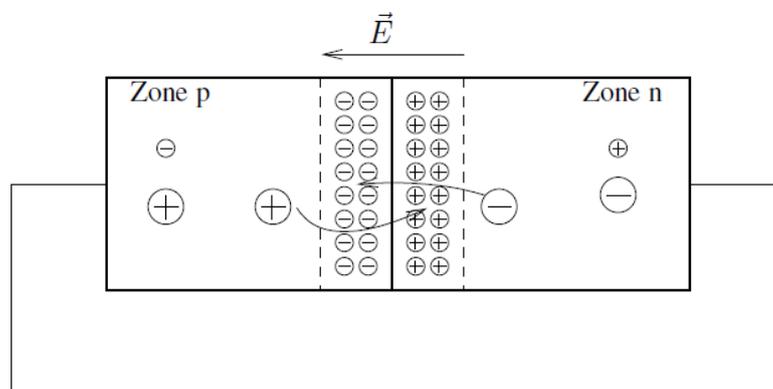


Figure II.1 : Jonction P-N à l'équilibre

Dans la zone de transition existe une charge d'espace due aux charges non compensées des noyaux des impuretés. En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs.

Substrat	Potentiel de jonction (V @ 25 °C)	Mobilité d'électrons ( $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ @ 25 °C)	Mobilité de trous ( $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ @ 25 °C)
Silicium (Si)	0.27	0.39	0.19
Germanium (Ge)	0.71	0.14	0.05
Arséniure de gallium (GaAs)	1.03	0.85	0.05

Table II.1: Caractéristiques des substrats utilisés dans la jonction PN

### III.1 Jonction P-N polarisée en inverse :

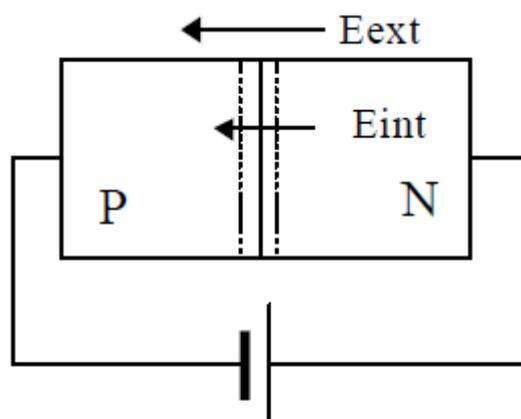


Figure II.2: Jonction PN polarisée en inverse

Dans cette situation, le champ électrique externe créé par le générateur de f.e.m, ( $V_{inv}$ ) s'ajoute au champ interne de la jonction : la hauteur de la barrière de potentiel augmente.

Seul un courant de minoritaires est possible à travers la jonction. C'est le courant inverse ou courant de fuite. A température ambiante, ce courant est très faible (100 nA). Comme il dépend du nombre des minoritaires, il est fonction de la température : pour le silicium, il est négligeable en dessous de 110°C mais il devient si important au-dessus de 175°C qu'il interdit le fonctionnement de la jonction en diode. Pour le germanium le fonctionnement est impossible au-dessus de 85°C.

### III.2 Jonction P-N polarisée en direct :

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à

travers la jonction. Il existe pour une jonction P-N une tension de seuil qui est caractéristique du matériau (Tableau II.2).

Substrat	Ge	Si	GaAs
<b>Tension de seuil (V)</b>	0.21	0.71	1.03

Tableau II.2: : Tension de seuil

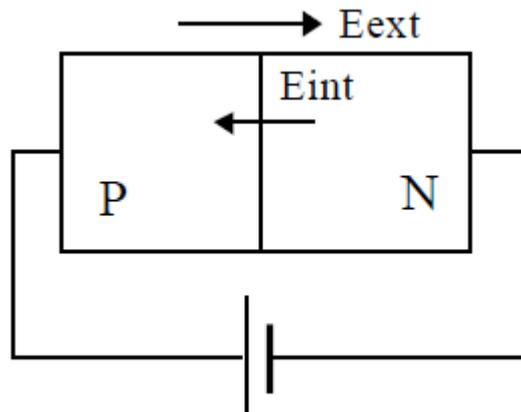


Figure II.3: Jonction P-N polarisée en direct

#### IV. Caractéristiques courant-tension :

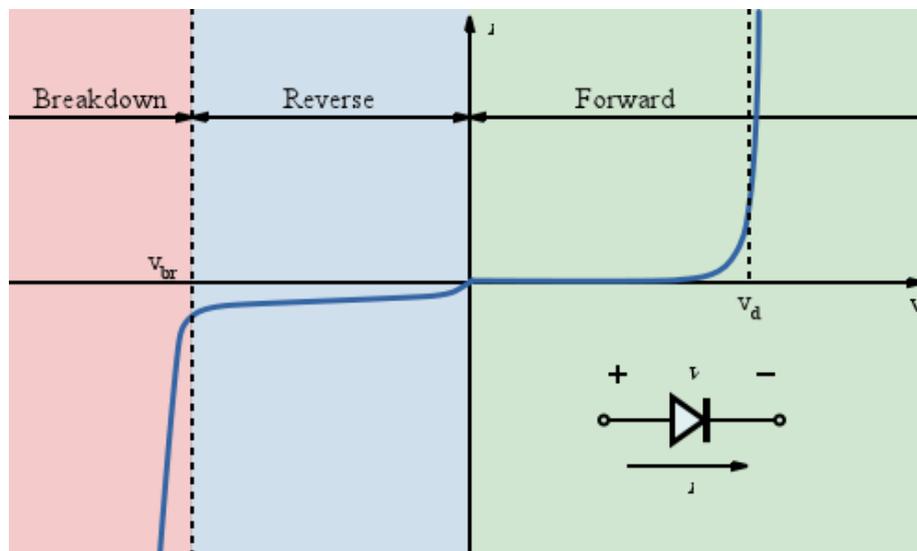


Figure II.4: Caractéristique Courant-tension

##### IV.1 Caractéristique directe

En dessous du seuil  $V_S$  le courant est très faible. Au-delà, on montre que le courant dans la jonction est lié au courant de saturation par :

$$I_D = I_{sat} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

Où :

$I_D$  : courant direct.

$I_{Sat}$  : courant de saturation.

$E_v$  : énergie donnée au semiconducteur.

$K$  : Constante de Boltzmann.

$T$  : température.

Le courant  $I_{Sat}$  est appelé courant inverse car si la diode est polarisée en inverse ( $V < 0$ )  $I_D = - I_{Sat}$ . Ce courant résulte du débit des charges (trous et électrons) qui traversent la jonction sous l'action du champ électrique.

### **IV.2 Caractéristique inverse**

Si la température est faible, la caractéristique est pratiquement confondue avec l'axe  $I = 0$ . Le courant inverse  $I_{br}$  étant un courant de minoritaires croît avec la température.

Au-delà d'une certaine valeur de  $V_{br}$ , il y a claquage de la jonction par effet d'avalanche.

L'épaisseur de la jonction étant très faible, même avec des potentiels peu élevés, le champ électrique au niveau de la jonction peut être très grand. Sous l'effet de ces champs intenses ( $E > 10^5 \text{ V.cm}^{-1}$ ), il y a ionisation des atomes et production d'électrons, qui sont eux-mêmes accélérés et qui provoquent de nouvelles ionisations (avalanche) qui rendent la jonction conductrice : si rien ne limite le courant, il y a destruction de la jonction par emballement thermique. La tension inverse admissible varie selon les diodes entre 50 V et 2000 V.

### **IV.3 Claquage inverse Zener**

Pour des diodes très fortement dopées et dont la zone de transition est très mince, le champ électrique peut provoquer la rupture directe de liaisons covalentes et le passage d'électrons de la bande de valence dans la bande de conduction. Pour des champs de l'ordre de  $2.10^7 \text{ V.cm}^{-1}$ , la tension de claquage est de l'ordre de 6 V pour des diodes très dopées. Le courant inverse croît alors brutalement. L'effet est réversible et non destructif. La jonction présente après le claquage une résistance dynamique très faible.

Les diodes Zener ont un dopage important et en agissant sur l'épaisseur de la zone de transition, on peut ajuster la valeur de la tension (dite tension de Zener) au-delà de laquelle se produit le claquage entre 3 V et 200 V.

### **IV.4 Limites d'utilisation des diodes**

La puissance dissipée dans une diode est égale au produit  $I.V_{AK}$  (différence de tension entre l'anode et la cathode). L'échauffement correspondant produit par l'effet Joule ne doit pas amener la température de la jonction au-dessus d'une valeur limite, fonction de la nature du

matériau, afin que le courant inverse ne dépasse pas des valeurs inacceptables. Pour le silicium cette température est de l'ordre de 185°C [4].

La tension inverse doit rester inférieure à la tension de claquage. Les diodes de redressement sont peu dopées pour avoir une bonne tenue en inverse.

Le courant direct maximum admissible est conditionné par la puissance maximum que peut dissiper la diode. Selon la surface de la jonction, le courant direct admissible peut varier entre quelques milliampères pour une diode de signal et quelques dizaines d'ampères pour une diode de puissance.

## **V. Conclusion**

Chaque élément à base de semiconducteurs est constitué essentiellement de 2 deux morceaux de ce dernier, un morceau de type P dopé par des impuretés trivalentes, et un morceau de type N dopé par des impuretés pentavalents, la réunion des deux morceaux constitue la jonction PN.

Dans ce chapitre on a défini cette jonction, expliquer ses principes, et étudier ses différents caractéristiques électriques, afin de rendre simple l'étude des Diode Electroluminescentes (LED) le sujet principale dans ce travail.

## Chapitre III :

# Les Diodes électroluminescentes

### I. Introduction

Considérées comme les sources du futur, les LED ont dominé les titres des articles de la presse technique pendant des années. Les LED impressionnent par leur durée de vie, et, en comparaison avec les sources conventionnelles, contribuent largement à la protection de l'environnement, grâce à leur faible consommation énergétique. Cependant, leur luminance constituait un point faible. Ce paramètre a fait l'objet d'intenses développements depuis des années.

### II. Définition :

LED est un mot anglophone pour « light emitting diode » ce qui signifie « diode électroluminescente ». L'acronyme francophone serait donc DEL. [5]

Une LED est un composant électronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens - de l'anode vers la cathode de plus elle produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique incohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.

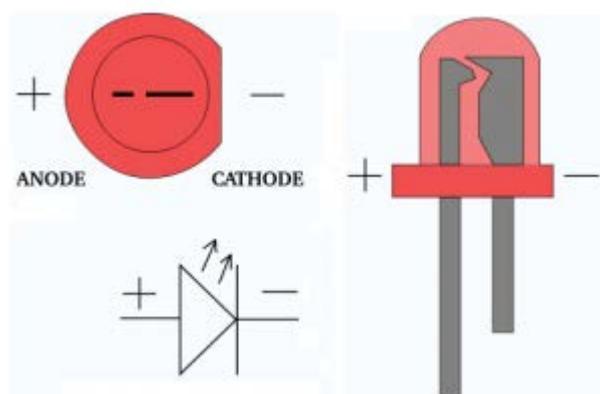


Figure III.1: Schéma d'une LED

### III. Historique :

La première diode électroluminescente rouge a été créée par Nick Holonyak Jr. et Sam Bevacqua de la compagnie General Electric (GE) en 1962 [6]. Cependant la première émission de lumière par un semi-conducteur date de 1907 et fut découverte par Henry Joseph Round [7]. A noter également que les LED émettant dans l'infrarouge sont plus anciennes (elles sont souvent utilisées dans les télécommandes des téléviseurs, lecteurs DVD,...). C'est Rubin Braunstein qui a découvert, en 1955, l'émission infrarouge de l'arséniure de gallium (GaAs) et d'autres types de semi-conducteurs.

Dans les années 60, des groupes industriels tels que International Business Machines (IBM), Radio Corporation of America (RCA), General Electric (GE),... travaillèrent activement sur les LED. Expérimentateurs à Texas Instruments, Bob Biard et à Gary Pittman, ont eu découvert en 1961 que l'arséniure de gallium émet de la lumière infrarouge lorsqu'un courant électrique est appliqué au semi-conducteur. B. Biard et G. Pittman ont pu établir la priorité de leur travail et ont déposé le brevet pour la diode électroluminescente infrarouge. C'est ainsi que la première LED commercialisée était une LED infrarouge émettant à 870 nm par Texas Instrument pour 130 dollars américains. Dans le même temps GE distribuait des LED émettant dans le rouge pour 260 \$ [8]. Du fait de leur prix très élevé, les LED étaient, à cette époque, vendues en très petites quantités. En 1964, IBM utilisa des LED à base de GaAsP (arséniure phosphure de gallium) sur des cartes d'ordinateur. Ce fût le premier pas vers la toute première utilisation industrielle des LED comme indicateur lumineux binaire. Leur faible consommation et leur durée de vie leur assurèrent un attrait sans failles des industriels. Bien que les LED aient une efficacité lumineuse faible, durant les années 60 et 70, Monsanto et Hewlett-Packard développèrent des chaînes de fabrication pour augmenter les volumes de production. Ceci a eu pour effet de faire diminuer considérablement le coût unitaire de fabrication des LED ce qui permit l'expansion du marché des LED comme indicateur visuel. D'abord dans les calculatrices puis dans les montres à affichage numérique [8].

Dans le même temps, les progrès réalisés dans la technologie des semi-conducteurs GaP (phosphure de gallium) permirent de mettre sur le marché des LED vertes. Bien que leur efficacité soit moins importante que celle des LED rouges, la sensibilité de l'œil humain dans le vert a compensé cet effet.

Dans les années 90, les recherches, entre autre, de Shuji Nakamura dans la technologie des semi-conducteurs InGaN (nitride de gallium indium) permirent la création de LED bleue et par conséquent de LED blanches par l'utilisation couplée de LED bleue et de luminophore jaune. Du fait de la disponibilité d'une palette quasi complète de couleurs, les LED devinrent rapidement des éléments incontournables des applications colorées en éclairage [9].

De nos jours, les LED commencent à être compétitives dans le domaine de l'éclairage général. Toutefois les LED ne remplaceront pas les ampoules à incandescence classiques. En effet elles imposeront une nouvelle philosophie de l'éclairage.

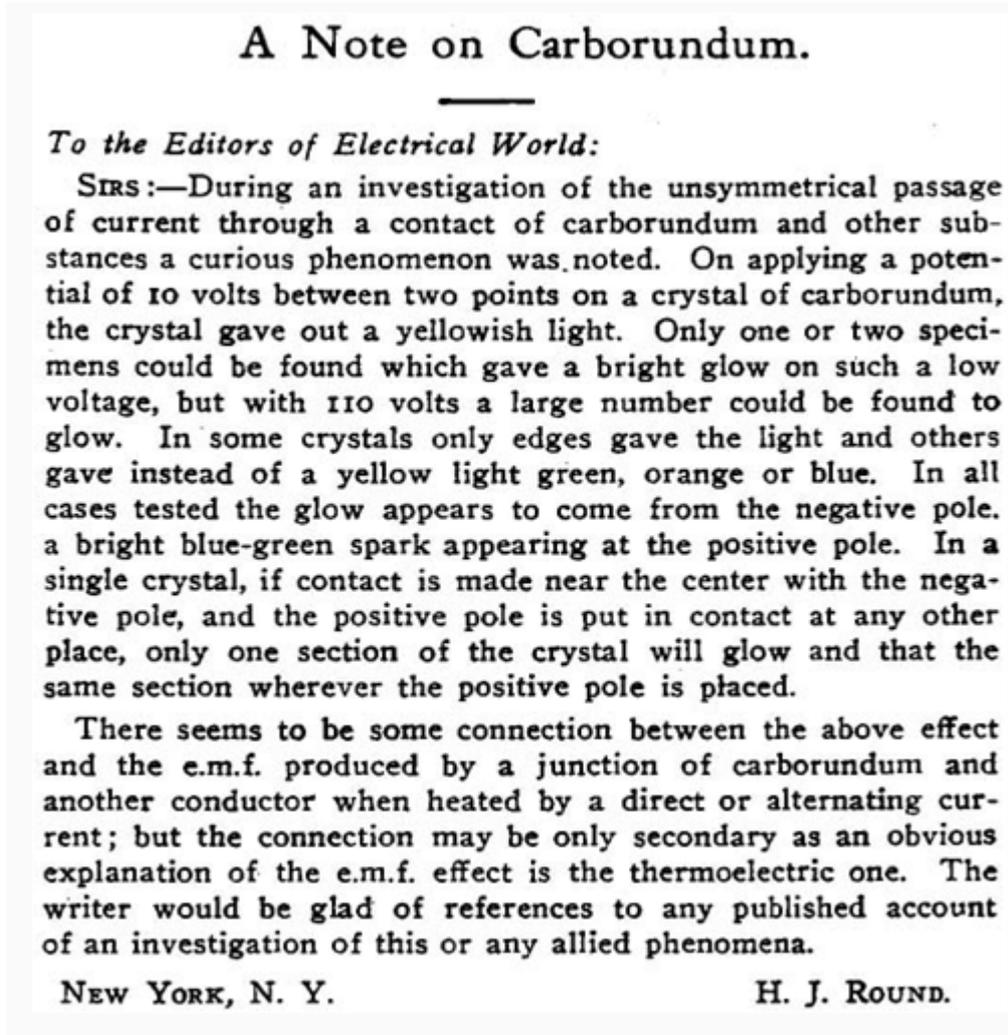


Figure III.2: La découverte d'électroluminescence par Henry Joseph Round en 1907 [10]

## IV. Les différents types de LED :

### IV.1 Les LED CMS :

Il s'agit de LED classique à faible courant (20-30 mA) mais miniaturisées pour les circuits électroniques. Le sigle français CMS signifie Composants Montés en Surface ou en Anglais SMD pour « Surface Mounted Device ».

Ces LED fonctionnent exactement sur le même principe que les LED classique sauf qu'elles sont miniaturisées à l'extrême pour s'intégrer dans des applications où il n'y a pas beaucoup de place. Ces LED ont donc une faible puissance et ne dégagent que très peu de chaleur.



Figure III.3 : LED montée en surface

#### IV.2 Les LED Colorées :

Il existe une large gamme de LED de couleurs. Les longueurs d'onde rencontrées s'étendent de l'ultraviolet à l'infrarouge. Toutefois, il n'est pas possible de trouver toutes les longueurs d'onde du visible. Par exemple on parle de « green gap » pour qualifier la zone comprise entre (550- 570) nm. On ne sait pas, dans cet intervalle de quelques dizaines de nanomètres, produire des LED ayant un rendement acceptable.

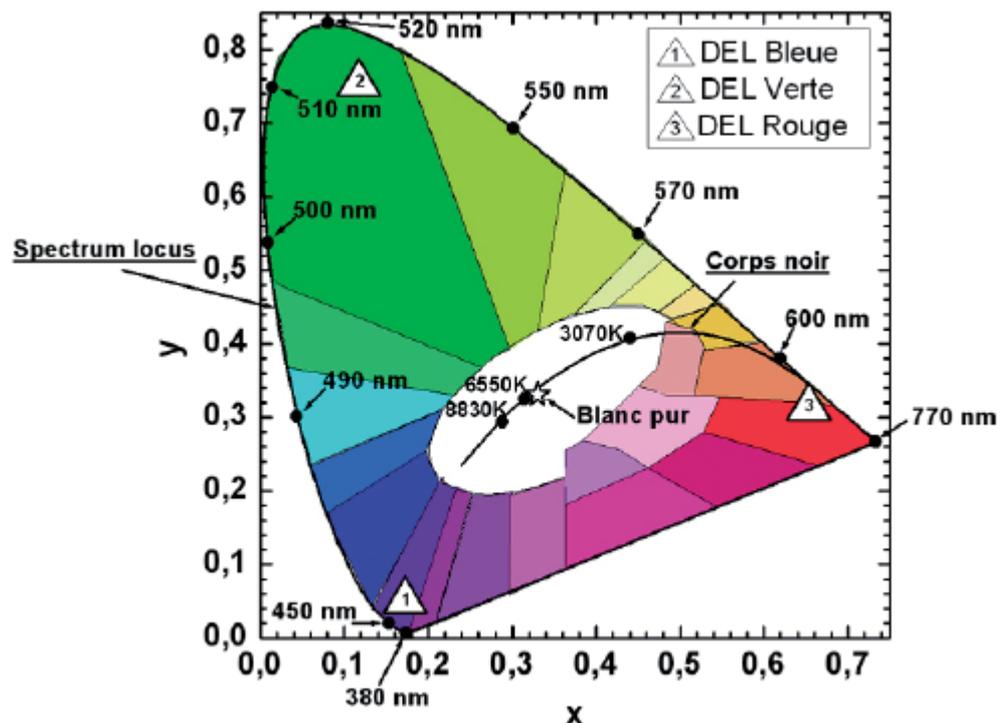


Figure III.4: Diagramme de chromaticité

On remarque que le cyan et le vert possèdent un spectre plus étalé que les autres couleurs. Ceci se traduit par une pureté moindre. Ce qui se remarque sur le diagramme de chromaticité (CIE). Les zones délimitant le vert sont, en effet, plus éloignées du bord que les autres couleurs.

Généralement les couleurs disponibles sont les suivantes :

- Bleu roi (455 nm)
- Bleu (470 nm)
- Cyan (505 nm)
- Vert (530 nm)
- Ambre (590 nm)
- Rouge orangé (617 nm)
- Rouge (625 nm)

### **IV.3 Les LED blanches :**

#### **❖ Diodes électroluminescentes bleues**

La couleur d'une LED standard est fixée par la valeur de l'énergie de bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur utilisé. Pour un semi-conducteur de faible bande interdite de 1,5 à 2 eV (par exemple (Al,Ga)As ou (Al,Ga,In)P), la couleur d'émission est le rouge. Pour un semi-conducteur avec une grande bande interdite de 2,5 à 3 eV (cas de (Ga,In)N), la lumière produite est plutôt bleue et la longueur d'onde d'émission peut aller jusqu'à dans l'ultra-violet au-delà de 3,5 eV (cas de (Al,Ga)N). La zone active des LED est en fait constituée de puits quantiques formés par l'insertion d'un semi-conducteur dans un autre semi-conducteur de bande interdite supérieure. Ce dernier joue le rôle de barrière pour les porteurs confinés dans le puits. Sous l'effet du confinement imposé par la barrière, des niveaux d'énergies discrets apparaissent dans le puits de potentiel. Leur position en énergie varie entre la valeur de l'énergie de bande interdite du puits et celle de la barrière. L'émission de lumière correspond alors aux recombinaisons électrons-trous entre les niveaux d'énergie fondamentaux. Lorsque l'épaisseur du puits augmente, les niveaux fondamentaux se rapprochent du fond du puits, et l'énergie des photons émis diminue pour tendre vers celle qui correspond au matériau du puits.

#### **❖ Comment obtient-on de la lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes ?**

On rencontre dans le commerce une large gamme de LED blanches. Les températures de couleur des modèles s'étendent de 2700K à 10 000 K environ [Annexe 1].

A l'intérieur du diagramme de chromaticité de la CIE, les constructeurs définissent des zones permettant de trier les différentes LED blanches en fonction de leurs caractéristiques colorimétriques (coordonnées  $x$ ,  $y$ ). Ces zones sont propres à chaque constructeur et ne sont pas normalisées.

On distingue pour le blanc trois grandes zones principales, elles même subdivisées [11] :

Blanc chaud (2670 K à 3500 K)

Blanc neutre (3500 K à 4500 K)

Blanc froid (4500 K à 10 000 K)

Le blanc n'est pas une radiation monochromatique. Contrairement aux autres couleurs, le spectre d'une LED blanche n'est pas fin : il est composé d'un mélange de différentes longueurs d'ondes. Ainsi d'obtenir du blanc avec une LED, il existe plusieurs méthodes :

#### ❖ Bleu + phosphore

La première méthode, et la plus employée, repose sur le principe suivant :

Deux photons de longueurs d'ondes complémentaires ( $\lambda$ courte et  $\lambda$ longue) atteignant simultanément la rétine produisent sur l'œil humain une sensation de lumière blanche. Bien qu'en théorie on puisse utiliser une infinité de combinaisons, la mise en œuvre de ce principe est réalisée par l'utilisation d'une LED bleue recouverte d'une ou de plusieurs couches de phosphore. Au contact du phosphore, une partie de la radiation bleue ( $\lambda$ courte) est convertie en radiations de plus longue longueur d'onde ( $\lambda$ longue) jaune.

Généralement on utilise un phosphore jaune qui permet d'obtenir des LED d'une température de couleur de l'ordre de 5500K. Pour produire du blanc chaud, dit « warm white », de l'ordre de 3200K, on ajoute une couche de phosphore qui produit un rayonnement rouge. Ceci réduit le rendement lumineux de la LED. La nature et la quantité du ou des phosphores utilisés ont une influence sur les caractéristiques du blanc (température de couleur et IRC : **I**ndice **R**endu de **C**ouleur) [Annexe 2] mais aussi sur le rendement lumineux final exprimé en lm/W.

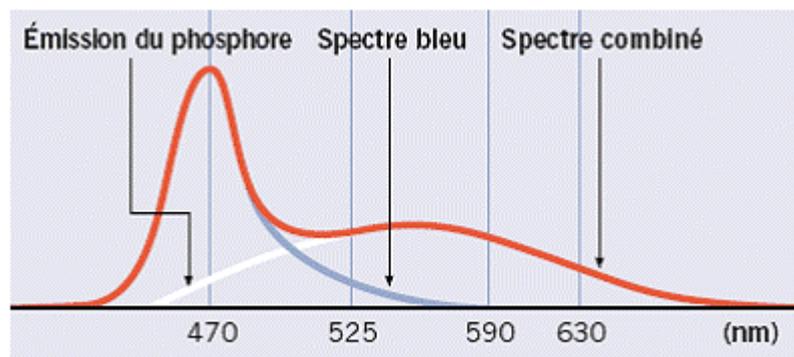


Figure III.5: LED bleue recouverte de phosphore

#### ➤ Avantage :

- Bon rendement lumineux
- Economique

#### ➤ Inconvénients :

- Cette méthode a tendance à produire un blanc qui possède un halo jaune à la périphérie tandis que la tache centrale est bleutée. Ceci est dû au fait que le bleu possède une émission très directionnelle et le jaune omnidirectionnelle. Ceci entraîne une inhomogénéité du flux.
- Mauvais IRC s'il n'y a qu'une couche de phosphore jaune.

### ❖ L'ultraviolet et le phosphore :

Le principe de cette méthode est de convertir un rayonnement ( $\lambda_{\text{courte}}$ ) en radiations visibles. A noter que cette technique est déjà utilisée pour les lampes fluorescentes, appelées « néons ».

La conversion du rayonnement ultraviolet est réalisée par une ou plusieurs couches de phosphores.

#### ➤ Avantages

- Possibilité de produire une large gamme de blancs
- Bonne uniformité (pas de phénomène de halo)

#### ➤ Inconvénients

- Rendement lumineux inférieur à la méthode « bleu + phosphore » atteignant simultanément la rétine produisent sur l'œil humain une sensation de lumière blanche.
- Bien qu'en théorie on puisse utiliser une infinité de combinaisons, la mise en œuvre de ce principe est réalisée par l'utilisation d'une LED bleue recouverte d'une ou de plusieurs couches de phosphore. Au contact du phosphore, une partie de la radiation bleue ( $\lambda_{\text{courte}}$ ) est convertie en radiations de plus longue longueur d'onde ( $\lambda_{\text{longue}}$ ) jaune. Généralement on utilise un phosphore jaune qui permet d'obtenir des LED d'une température de couleur de l'ordre de 5500K. Pour produire du blanc chaud, dit « warm white », de l'ordre de 3200K, on ajoute une couche de phosphore qui produit un rayonnement rouge. Ceci réduit tangiblement le rendement lumineux de la LED. La nature et la quantité du ou des phosphores utilisés ont une influence sur les caractéristiques du blanc mais aussi sur le rendement lumineux final exprimé en lm/W.
- L'émission d'UV détériore le package. Ce qui réduit la durée de vie de la source et opacifie le boîtier.

### ❖ RGB

Le principe est de mélanger le flux lumineux de 3 puces ou de 3 LED (une rouge, une verte et une bleue).

Les caractéristiques colorimétriques de la lumière produite est fonction de la proportion relative de rayonnement des trois composantes.

Il est courant d'utiliser plus de trois sources. Ceci permet de pouvoir obtenir plus de nuances de couleurs ou encore d'être plus précis sur la couleur obtenue. On peut alors adjoindre du cyan, de l'ambre ou du rouge orangé.

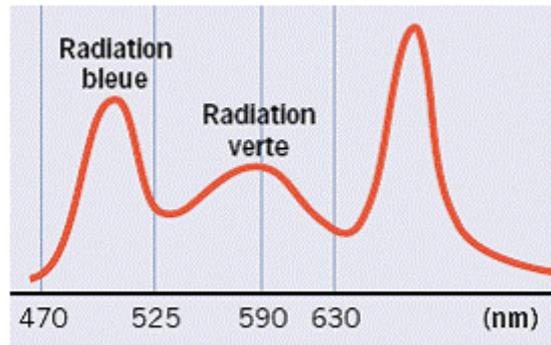


Figure III.6: LED Ultraviolet + Phosphore

➤ Avantage :

- Obtention de nombreuses couleurs
- Précision
- Contrôle dynamique des caractéristiques colorimétriques
- Le rendement lumineux est le meilleur de toutes les méthodes. En effet il n'y a pas de phosphores qui absorbent une partie du flux.

➤ Inconvénients :

- Nécessité d'inclure dans un unique boîtier trois puces possédant chacune leur propre valeur de courant d'alimentation.
- Complexité de l'ensemble
- Nécessité d'homogénéiser le flux résultant
- La solution RGB est la plus onéreuse
- Taille du package plus importante
- La dérive en température (quantité de flux et Longueur d'onde).

❖ **PRS LED**

Cette méthode utilise des LED appelées PRS-LED (Photon Recycling Semi-conductor Led). Deux régions actives sont présentes dans la led: une primaire qui émet du bleu et une secondaire qui absorbant une partie du rayonnement bleu engendre des photons jaunes. Leur réunion donne naissance à un rayonnement blanc.

**IV.4 Les LED UV**

Les premières LED mises au point émettaient dans l'infrarouge, et ce n'est qu'en 1962 que Nick Holonyak Jr, de la compagnie de General Electric, a développé une LED émettant dans le domaine visible.

Les LED rouges furent les premières à apparaître. D'autres couleurs, l'orange, le vert... suivirent assez rapidement. Mais d'autres couleurs, comme le bleu, tardèrent à être mises sur le marché. En effet, ce n'est que dans les années 90 qu'elles furent commercialisées. Cela est dû à la difficulté de produire du bleu avec un matériau semiconducteur. Il n'est donc pas aussi aisé de produire une LED rouge qu'un LED bleue.

La couleur d'une LED correspond, en première approximation, à une longueur d'onde. La longueur d'onde est associée au gap via la formule suivante :

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{E_g \cdot e}$$

T.Q :

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$c$  : Célérité.

$h$  : Constante de Planck.

$E_g$  : Gap d'énergie.

$e$  : Charge d'électron.

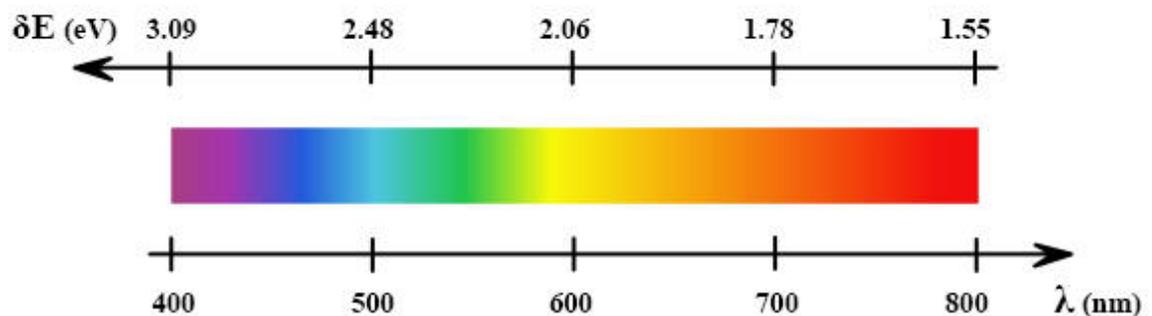


Figure III.7: Longueur d'onde et gap

Concrètement ce gap correspond à une distance géométrique, directement liée à la maille cristalline des matériaux électroluminescents. Il est plus aisé de réaliser des LED avec un petit gap car un grand gap est plus difficile à maîtriser. Donc il est logique que les LED UV, au faible gap par rapport aux LED du domaine visible, aient posé des problèmes aux laboratoires.

#### **IV.5 LED multicolores :**

Les LED multicolores sont généralement utilisées dans les appareils électroménagers. Par exemple comme voyant lumineux pour la TV. La LED est verte en fonctionnement, rouge à l'arrêt et orange lorsqu'on appuie sur un bouton de la télécommande.

**LED bicolores :** Ces LED possèdent en général deux pattes. La couleur, rouge ou vert, dépend du sens du courant.

**LED tricolores :** Ces LED possèdent trois pattes (celle du centre est la cathode commune). La première patte est l'anode rouge, la troisième l'anode verte. Lorsque les deux anodes sont alimentées, une couleur orange est obtenue.

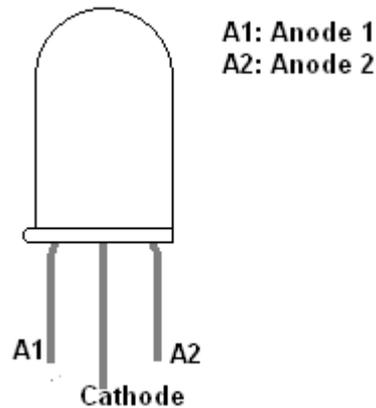


Figure III.8 (a) : Une LED tricolore

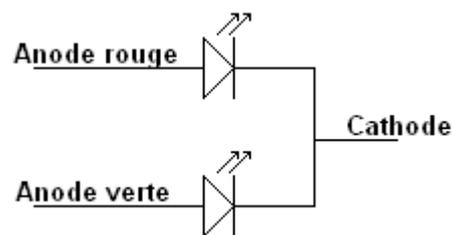


Figure III.8 (b): Modélisation d'une LED tricolore

#### **IV.6 Les LED de puissance :**

Les diodes électroluminescentes de puissance, définies comme celles dont le courant direct est supérieur ou égal à 350mA, constituent l'un des secteurs de l'électronique les plus prometteurs.

Aujourd'hui, Avago, Cree, Everlight, Kingbright, Philips LumiLeds, Nichia, Osram, Seoul Semiconductor et Toshiba figurant parmi les des fournisseurs les plus connus de ce type de composants.

Les LED de puissance émettent la lumière dans une sphère de 180°. Les lentilles permettent de concentrer vers l'avant de la lampe, en fonction de l'angle souhaité, tout le rayonnement émis. Les lentilles Petzl sont conçues pour optimiser l'efficacité de l'éclairage (rendement, homogénéité du faisceau).

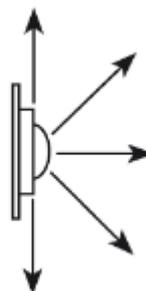


Figure III.9 (a): LED de puissance seule

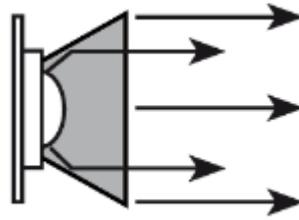


Figure III.9 (b): LED de puissance avec lentille

#### **IV.7 Les OLED (diodes électroluminescentes organiques)**

Les LED minérales sont bien différentes des OLED qui sont apparues il y a beaucoup moins de temps. Même si elles ont le même principe de fonctionnement, elles s'avèrent différentes en de nombreux points: ce seront de bonnes sources étendues (pas ponctuelles). Leur mauvais rendement et leur faible durée de vie leur empêche d'être utilisées.

Les OLED peuvent être utilisées en éclairage. En termes de rendu visuel, le grand avantage des OLED est qu'elles constituent des surfaces éclairantes diffuses nativement. Tandis que les LED sont des sources lumineuses ponctuelles.

- Spot lighting → sun
- Area lighting → sky

- Spot lighting → LED
- Area lighting → OLED

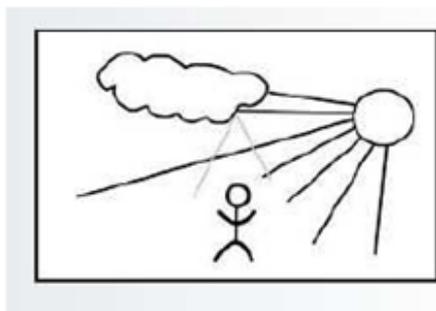


Figure III.10: Analogie Ciel/OLED Soleil/LED

#### ➤ Application

- Lecteurs MP3
- Téléphones portables (les petits écrans auxiliaires)
- Appareils photo numériques
- Autoradios
- Tableaux de bord de voiture

Les LED transparentes ne sont plus un rêve. Ce type d'OLED ouvre la voie à de nombreuses applications très prometteuses.

## V. Caractéristiques physiques d'une LED :

### V.1 Propriétés électroniques des LED

Comme n'importe quelle diode, les LED ont un fonctionnement passant ou non passant qui dépend de la tension à leurs bornes. Cela s'observe lorsque l'on trace leur caractéristique courant - tension  $I(V)$  (figure III.11). Cette caractéristique nous indique également qu'il est nécessaire d'alimenter une LED avec une tension minimale pour que celle-ci émette de la lumière.

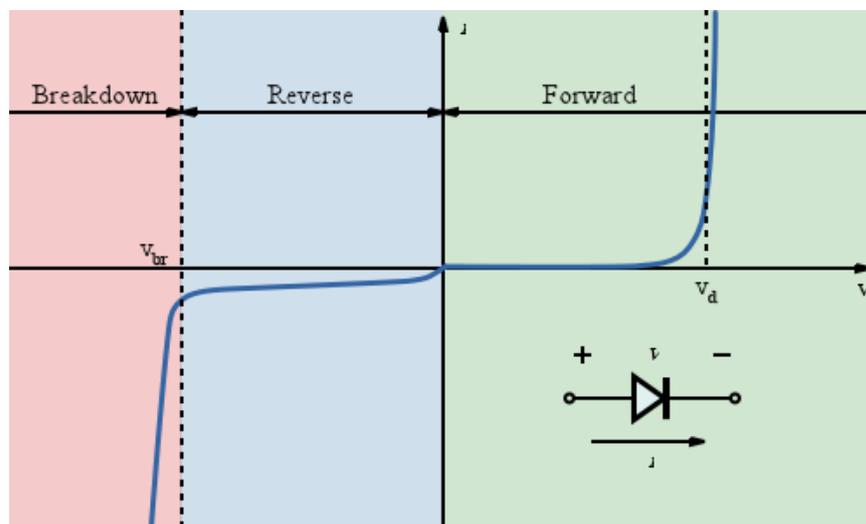


Figure III.11: Caractéristique d'alimentation d'une LED

De plus, s'il y a surtension elle grille ou s'altère et s'il y a sous tension, elle ne fonctionne pas de façon optimale. Pour pouvoir utiliser une LED dans les meilleures conditions il est préférable de connaître les différents termes utilisés pour caractériser électriquement

#### ❖ Propriétés principales

La majorité des propriétés qui suivent sont déterminées en traçant la caractéristique  $I(V)$  de la LED.

##### ➤ Tension

- $V_f$  (tension directe - forward voltage) : Tension appliquée dans le sens direct ; vaut être généralement entre 1,8V et 5V.
- $V_r$  (tension inverse admissible - allowable reverse voltage) : Tension appliquée dans le sens indirect. La LED n'y est pas passante, mais tout comme une diode classique, elle ne supporte pas qu'on lui applique une tension inverse trop importante.

##### ➤ Courant

- $I_F$  (courant direct - forward current): Courant qui traverse la LED lorsqu'elle est alimentée dans le sens direct.

- Pour les LED basse consommation :  $I_F=2$  mA
  - Pour les LED classiques 5 mm :  $I_F=20$  mA
  - Pour les LED de puissance:  $I_F$  vaut de 100mA et plus.
- $I_{fp}$  (courant direct lors d'une impulsion -pulse/peak forward current) : Courant direct admissible par la LED pendant un temps bref. La valeur de  $I_{fp}$  peut aller jusqu'à plusieurs fois celle de  $I_f$ .

Cette propriété est utilisée lorsque la LED est alimentée en PWM (courant modulé en largeur d'impulsion) ou en régime impulsionnel.

- $I_r$  : (courant inverse admissible - allowable reverse current) : Courant maximal supporté lorsque la LED est alimentée dans le sens indirect.

➤ Résistance dynamique

Elle vaut l'inverse de la pente de la tangente à la caractéristique  $I(V)$  et s'exprime en Ohm.

### ❖ Propriétés secondaires

Les propriétés secondaires sont celles qui sont rarement données par les constructeurs. Toutefois elles peuvent avoir leur importance lorsqu'on souhaite réaliser un circuit électronique.

- Capacité (exprimée en Faraday)
- Inductance (exprimé en Henry)
- Temps de réponse (exprimé en ms)

### V.2 Propriétés photométriques des LED

Les propriétés photométriques des LED peuvent être scindées en deux parties : propriétés optiques et propriétés colorimétriques.

#### ❖ Propriétés optiques des LED :

Alors qu'une ampoule à incandescence classique émet dans presque tout l'espace et de façon très homogène, le faisceau d'une LED classique est beaucoup plus directif (angle d'émission de 10, 20, ou 30° environ). Cela est schématisé sur la (figure III.12). Cela étant les nouvelles LED à forte puissance émettent dans des cônes d'émission d'environ 110° - 140°.

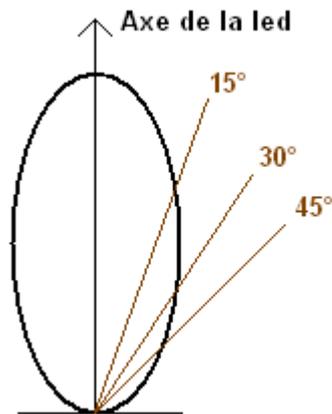


Figure III.12: Représentation de différents angles d'émission de LED

Les LED de puissance possèdent des faisceaux moins directs.

❖ **Propriétés colorimétriques des LED :**

On définit :

$\lambda_p$  : longueur d'onde du spectre dont le flux énergétique relatif est maximum .

$\Delta\lambda$  (ou  $\lambda_{1/2}$ ) : largeur spectrale à mi-hauteur (spectral line half-width), il s'agit de l'intervalle pour lequel le flux énergétique relatif reste supérieur à 1/2 fois la valeur maximale. Elle est de l'ordre de 10 à 40 nm.

$\lambda_d$  : longueur d'onde dominante (dominate wavelength) qui procure à la LED son aspect coloré.

La distinction entre les deux longueurs d'onde  $\lambda_d$  et  $\lambda_p$  est importante puisqu'il peut parfois y avoir quelques dizaines de nm d'écart mais la plupart du temps il ne s'agit que de 2 - 7 nm.

Don le cas des LED ayant un spectre d'émission assez fin,  $\lambda_p$  et  $\lambda_d$  sont proches.

A l'heure actuelle nous pouvons trouver des LED dont les longueurs d'onde balayent le spectre visible. Les valeurs présentes le tableau (III.1) sont celles rencontrées couramment sur les LED du commerce. Les LED roses et blanches ne figurent pas dans le tableau car leur couleur est le fruit de la superposition de différentes longueurs d'onde. Pour les LED blanches on utilise la température de couleur pour les distinguer.

Couleur	$\lambda$ (nm)
Ultraviolet	395
Bleu	430-470
Vert	525-565
Jaune	585-590
Orange	600-620
Rouge	625-655

Table III.1: Couleurs et longueurs d'onde associées

Cela concerne, entre autre, la prise en compte de la dépendance entre le courant traversant la jonction de la LED, sa température, et sa longueur d'onde d'émission (figure III.13) [12]

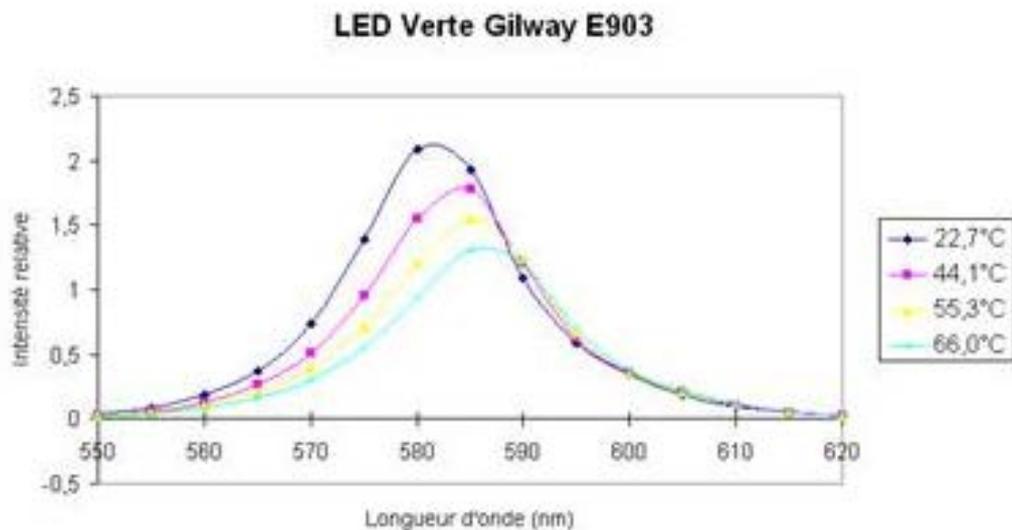


Figure III.13: Evolution de la répartition relative spectrale d'une LED verte en fonction de la température

D'autres types de LED ne sont pas aussi sensibles à la température (fig. 4) mais peuvent subir des variations d'un point de vue chromatique.

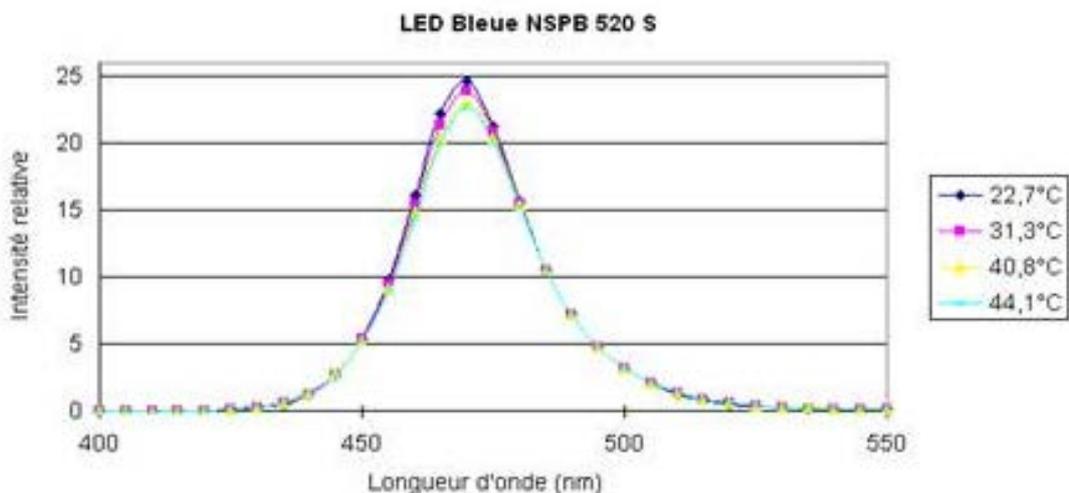


Figure III.14: Evolution de la répartition relative spectrale d'une LED bleue en fonction de la température

### **Propriétés environnementales des LED :**

Les LED sont désormais sans plomb (lead free), ceci permet aux LED d'assurer un développement durable à l'humanité comparé aux lampes à incandescence et aux lampes à décharge. Ces dernières possèdent la plupart du temps du mercure et d'autres métaux dangereux pour l'environnement.

## VI. Le futur des LED

Les LED font l'objet d'une recherche approfondie depuis de nombreuses années. À l'heure actuelle, les LED ne sont pas dotées de performances et de caractéristiques miraculeuses. Toutefois, les perspectives d'évolution ainsi que le caractère innovant des LED leur ouvre de nombreuses portes.

Depuis les années soixante, le rendement lumineux des LED ne cesse de progresser. Ceci est lié à l'utilisation de nouveaux matériaux mais également la mise au point et la maîtrise de nouveaux processus (Figure III.15).

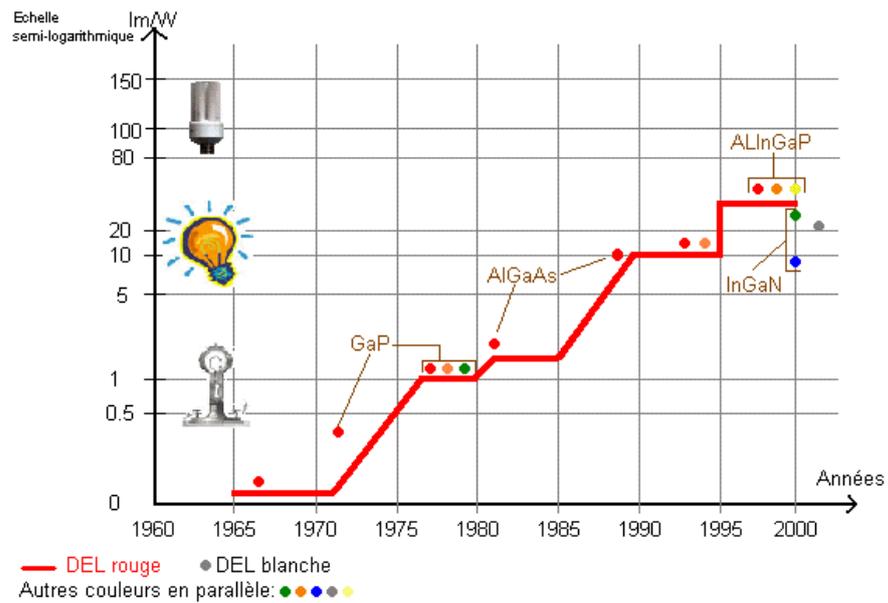


Figure III.15: Evolution des performances des LED

On pense aboutir à une efficacité lumineuse de l'ordre de 300 lm/W. Autant dire que le futur des LED est plutôt prometteur. Les LED sont donc une technologie majeure du futur.

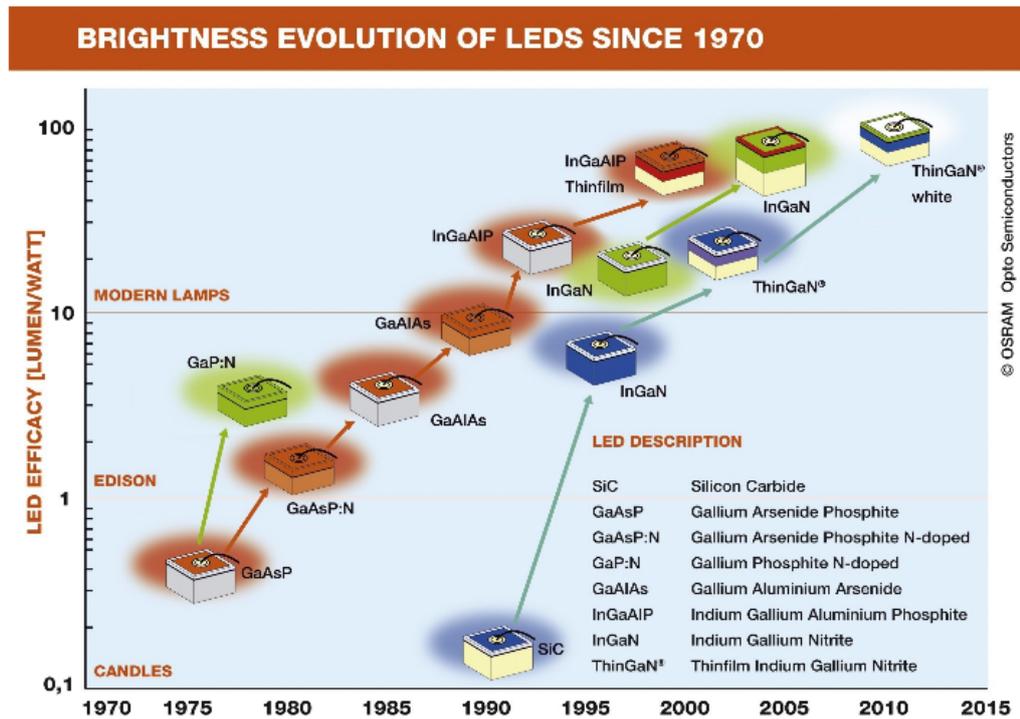


Figure III.16: Evolution de l'efficacité des LED

Un groupement de professionnels et de chercheurs ont mis au point la feuille de route (en 2002) suivante :

Technology	SSL-LED 2002	SSL-LED 2007	SSL-LED 2012	SSL-LED 2020	Incandescent	Fluorescent
Luminous efficacy (lm/W)	25	75	150	200	16	85
Lifetime (kh)	20	>20	>100	>100	1	10
Flux (lm/lamp)	25	200	1,000	1,500	1,200	3,400
Input power (W/lamp)	1	2.7	6.7	7.5	75	40
Lumens cost (\$/klm)	200	20	<5	<2	0.4	1.5
Lamp cost (\$/lamp)	5	4	<5	<3	0.5	5
Colour rendering index (CRI)	75	80	>80	>80	95	75
Lighting markets penetrated	Low-flux	Incandescent	Fluorescent	All		

Figure III.17: feuille de route et recommandation de SSL-LED (2002)

On peut noter que cette feuille de route est, dans l'ensemble, tenue. En effet, les valeurs données se sont réalisées. Dans l'ensemble, les performances des LED ont doublé tous les 18-24 mois.

Ainsi, sûrement les LED remplaceront-elles un jour à grande échelle les lampes à incandescence? Leur manque relatif de luminosité (les LED les plus puissantes génèrent moins de 200 lumens) pourrait être compensé par une multiplication des points lumineux. Cette multiplication peut même être interne à la LED.

Les LED sont à coup sûr des actrices du développement durable. Il est probable que leur contribution au progrès continuera, que ce soit par le biais de leurs évolutions technologiques ou encore par le biais des OLED, utilisées principalement pour la confection d'écrans ultraminces déjà fonctionnels.

### **VII. Conclusion :**

Les LED ne sont qu'un type particulier de diodes à semi-conducteur avec la capacité d'émettre un signal lumineux si alimenté proprement sous certaines conditions.

Dans ce chapitre nous avons fait une étude étendue sur ce type de diodes, tout en commençant par les définir, puis étudier historiquement leur développement, leur types, ainsi que leur différents caractéristiques ; nous avons terminé par une étude prospective sur le futur de ces LED et leur rôle éventuel dans notre vie.

## *Conclusion Générale*

Ce travail consistait en une étude complète sur les diodes électroluminescentes, ces principes de fonctionnement, ces différents types, ainsi que le futur de la technologie LED. Ces LED ne sont qu'un type de diodes capable d'émettre un signal lumineux si mis sous une tension appropriée, et donc avec tous les avantages qu'ils ont, ils ont aussi quelques inconvénients restant à traiter.

Choisis comme la lampe du futur, la LED présente un choix plutôt efficace et écologique, mais il reste à penser d'une autre solution pour la rendre encore un choix plus économique ; plusieurs laboratoires s'occupent de ça, et d'ici quelques années, la prédominance des LED ne sera plus un rêve, avec l'utilisation des OLED comme des sources étendues, et les LED classiques comme des sources ponctuelles.

## Bibliographie

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_mechanics](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_mechanics)
- [2] Semiconductor Diodes (University of California at Berkeley Physics 111 Laboratory - Basic Semiconductor Circuits ) 2011.
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor>
- [4] <http://res-nlp.univ-lemans.fr/>
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Led>
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nick\\_Holonyak](http://en.wikipedia.org/wiki/Nick_Holonyak)
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Henry\\_Joseph\\_Round](http://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Joseph_Round)
- [8] <http://www.led-fr.net/historique-des-leds.htm>
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Shuji\\_Nakamura](http://en.wikipedia.org/wiki/Shuji_Nakamura)
- [10] E. FRED SCHUBERT "LIGHT-EMITTING DIODES - SECOND EDITION"2006.
- [11] Nicolas POUSSET, Bernard ROUGIÉ et Annick RAZET "Colorimétrie des LED : incertitudes et influence du courant électrique" 2009.
- [12] "Heading the InGaN LED chip and epi development (Osram)" Présentation faite à ForumLED, Lyon, 03 et 04 décembre 2009.
- [13] "Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination" – OIDA- (2002).  
[http://lighting.sandia.gov/lightingdocs/OIDA\\_SSL\\_LED\\_Roadmap\\_Full.pdf](http://lighting.sandia.gov/lightingdocs/OIDA_SSL_LED_Roadmap_Full.pdf)

## Annexes :

### Annexe 1: Température de couleur

#### Température de couleur

 Pour les articles homonymes, voir *Température (homonymie)*.

La **température de couleur** permet de déterminer la température (effective ou « virtuelle ») d'une source de **lumière** à partir de sa couleur. Elle se mesure en kelvins (unité du Système international, et dont le symbole est : K).

**Sommaire** [masquer]

- 1 Généralités
- 2 Marquage des lampes
- 3 Annexes
  - 3.1 Article connexe
  - 3.2 Lien externe

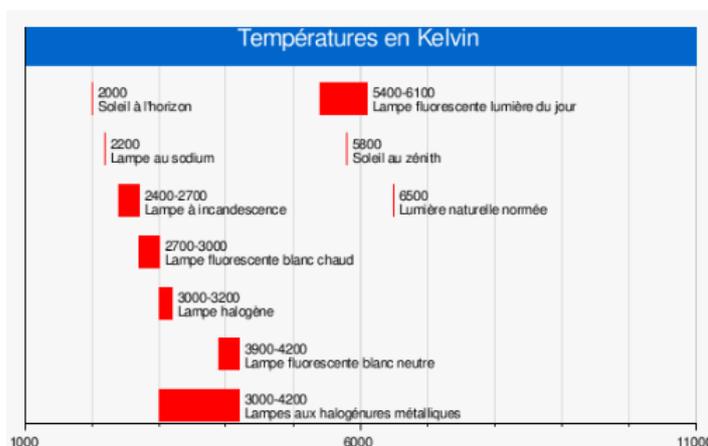
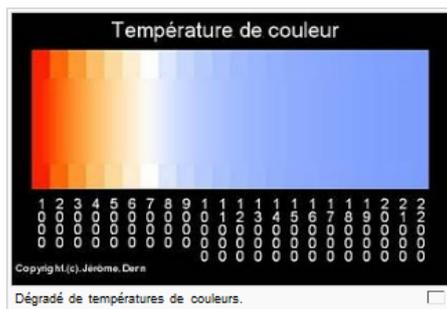
**Généralités** [modifier]

La couleur d'une source lumineuse est comparée à celle d'un **corps noir** théorique chauffé entre 2 000 et 10 000 K, qui aurait dans le domaine de la **lumière visible** un **spectre d'émission** similaire à la couleur considérée.

La couleur apparente d'une source lumineuse varie du rouge orangé de la flamme d'une bougie (1 850 K) à bleuté dans le cas d'un flash électronique (entre 5 000 et 6 500 K selon les fabricants) bien que certaines de ces températures n'aient aucune relation avec la température du corps noir.

Cette variation de couleur de la lumière dans une même journée n'est que difficilement reproductible par la lumière artificielle et souvent avec des appareils complexes et coûteux. Elle relativise la notion de normalité de la lumière naturelle.

Pour apprécier l'aspect et la qualité de la lumière il convient d'associer à la température de couleur l'**indice de rendu de couleur** ou IRC, chiffre entre 0 et 100 % qualifiant le respect des couleurs.



Différentes températures de couleur :

- Soleil à l'horizon 2 000 K
- lampe au sodium 2 200 K
- lampe à incandescence 2 400 à 2 700 K
- lampe fluorescente blanc chaud 2 700 à 3 000 K
- lampes aux halogénures métalliques 3 000 à 4 200 K
- lampe halogène 3 000 à 3 200 K
- lampe fluorescente blanc neutre 3 900 à 4 200 K
- Soleil au zénith 5 800 K
- lampe fluorescente lumière du jour 5 400 à 6 100 K
- lumière naturelle normée 5 000 K (D50) ou 6 500 K (D65)

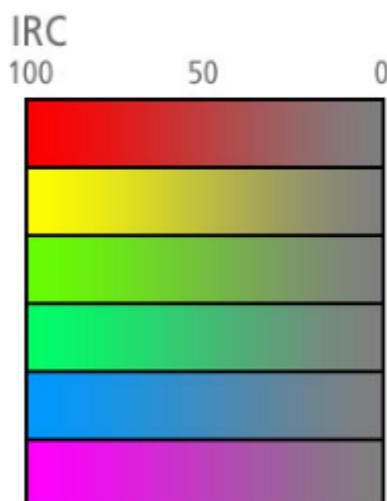
## Annexe 2: Indice de rendu des couleurs

### IRC (ou $R_a$ )

#### - indice de rendu des couleurs

Cet indice (à ne pas confondre avec la *température de couleur*) définit l'aptitude d'une lampe à nous faire distinguer toutes les couleurs. La valeur maximale d'IRC est 100.

La lumière du jour a un IRC de 100. Les ampoules à incandescence et halogènes ont un IRC proche de 100. Par contre, les tubes luminescents et les lampes fluocompactes (dites aussi "économiques") ont un IRC qui dépend de la composition de la poudre fluorescente qui tapisse leur verre. La qualité de lumière des lampes à LEDs blanches dépend aussi de la combinaison des composants électroniques et des éléments fluorescents.



L'IRC est souvent indiqué sur les lampes à l'aide d'un code de trois chiffres qui combine l'IRC et la *température de couleur*. Seul le premier chiffre concerne l'IRC.

Les lampes fluorescentes qui offrent un excellent rendu des couleurs **IRC 90-100** (codes 930, 940, 950...) sont les plus chères. Elles ont cependant un moins bon rendement lumineux que celles de la catégorie **IRC 80-89** (codes 827, 830, 840...), dont le très bon rendu des couleurs convient au logement et au bureau.

Il faudrait réserver les lampes avec un **IRC 70-79** (codes 730, 740... ou code propre au fabricant) pour les couloirs, et celles avec un **IRC 60-69** ou inférieur (codes 630, 640... ou code propre au fabricant) pour éclairer le garage ou la cave.

Les tubes luminescents avec un faible IRC portent souvent la mention "standard".

Les ampoules équipées de LEDs, destinées à remplacer les ampoules traditionnelles ou les spots halogènes, ont un IRC situé entre 75 et 85 - le marché professionnel propose des éclairage à LEDs avec un IRC allant jusqu'à 90.

Cet indice n'est pas influencé par la quantité de l'éclairage: le rendu des couleurs ne s'améliore pas si on allume deux tubes luminescents (ou deux lampes à LEDs) médiocres au lieu d'un seul.

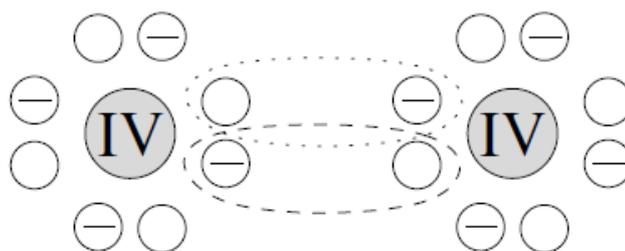


Figure I.8: Liaison au sein du réseau cristallin d'un semi-conducteur

Cette configuration résulte en une liaison covalente très solide, qui emploie tous les électrons ne laissant libre aucun. La (figure I.9) présente la géométrie tridimensionnelle du réseau cristallin d'un semi-conducteur intrinsèque.

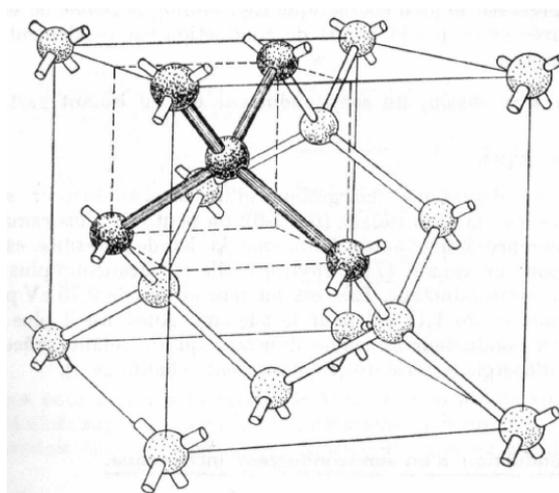


Figure I.9: Structure tridimensionnelle du réseau cristallin du silicium

Lorsque un électron franchit le gap et se retrouve dans la bande de conduction, il quitte son atome et se déplace librement à travers le réseau. Soumis à un champ électrique extérieur, cet électron se comporte comme un électron libre dans un conducteur : il se déplace dans le sens d'accroissement du potentiel du champ extérieur.

Or à l'ancien emplacement de l'électron dans le réseau cristallin, il se produit un phénomène particulièrement intéressant. Lorsqu'un électron se détache, l'état énergétique dans la bande de valence se trouve inoccupé, et dans le réseau apparaît une lacune, un emplacement où il manque un électron.

Cet emplacement exerce une attraction sur des électrons voisins du réseau ainsi, un électron de la bande de valence, ayant une énergie proche de celle qui correspond à l'état inoccupé, peut y être capturé ; à son tour, cet électron laisse son état libre : celui-ci peut capturer un autre électron, et ainsi de suite. De cette manière, un état vacant peut se propager à travers le cristal (figure I.10).

En physique une telle lacune d'électron a reçu le nom « trou ».